



DEUTSCHES
PATENTAMT

②1 Aktenzeichen: P 40 34 745.1
②2 Anmeldetag: 30. 10. 90
④3 Offenlegungstag: 18. 7. 91

DE 40 34 745 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1
30.10.89 DD WP H 01 P/334030

⑦1 Anmelder:
Friedrich-Schiller-Universität Jena, O-6900 Jena, DE

⑦2 Erfinder:
Staupendahl, Gisbert, Dr., O-6900 Jena, DE; Pöhler,
Manfred, Dr., O-4090 Halle-Neustadt, DE

⑤4 Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung, das einerseits neuartige technologische Wirkungen ermöglicht und andererseits durch die Vermeidung bzw. Minimierung unerwünschter Nebeneffekte, z. B. beim Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen, höchste Präzision und Effektivität der Bearbeitung gewährleistet.

Ziel der Erfindung ist eine hohe Gebrauchswertsteigerung einer Lasermaterialbearbeitungsanlage im Hinblick auf Applikationsbreite, Bearbeitungsqualität und Reproduzierbarkeit des technologischen Resultates.

Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe gelöst, indem der Laserstrahl zunächst in einer speziellen Anordnung zur variablen Laserstrahlteilung und Führung der Teilstrahlen in zwei Arbeitsstrahlen mit unterschiedlichen räumlichen Ausbreitungseigenschaften aufgeteilt, diese beiden Teilstrahlen dann kollinear überlagert und anschließend so auf das Werkstück fokussiert werden, daß verfahrensgemäß durch Hin- und Herschalten der Laserleistung zwischen den beiden Teilstrahlen eine dynamische Veränderung der Fokusparameter, insbesondere ihre optimale Anpassung an die Dynamik des Wechselwirkungsvolumens im Werkstück, realisiert werden kann.

DE 40 34 745 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung, dessen Hauptanwendungsgebiet das Laserschneiden unterschiedlichster Werkstoffe, insbesondere von Metallen, darstellt und das durch die Vermeidung bzw. Minimierung unerwünschter Nebeneffekte, z. B. beim Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen, der Bildung einer Riefenstruktur an den Schnittflächen und der Bartbildung durch anhaftende Schlacke an der Schnittunterkante, ferner eine Vergrößerung der bearbeitbaren Werkstoffdicke sowie eine Verringerung der Empfindlichkeit des Bearbeitungsprozesses gegen unerwünschte Verschiebungen der Fokussierung höchste Präzision und Effektivität der Bearbeitung gewährleistet und das darüber hinaus einem dem Fräsen analogen definierten Materialabtrag bis in größere Werkstofftiefen mittels Hochleistungslasern neue Perspektiven eröffnet.

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich mit dem Einfluß der Fokussierungsparameter auf den Materialbearbeitungsprozeß mit Hochleistungslasern befassen. Generell kann festgestellt werden, daß dabei Variationen der Fokussierung bisher lediglich mit rein mechanischen Mitteln realisiert werden. So kann eine Verbreiterung der Härtespur beim Laserhärten durch transversale Oszillation des Fokus mittels eines Schwingspiegels erreicht werden (vgl. z. B. H. Junge, Dissertation A, Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung, Dresden 1987).

Verschiebungen der Fokussierung in Strahlrichtung erfordern bisher eine Verschiebung der gesamten Fokussiereinrichtung, so daß eine schnelle Veränderung der Fokussierung, z. B. deren Anpassung an die Dynamik im Wechselwirkungsvolumen in Zeiten im ms-Bereich, unmöglich ist.

Es wurde gefunden, daß es insbesondere beim Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen mit CO₂-Hochleistungslasern, einer der häufigsten Laseranwendungen in der Materialbearbeitung, sowohl unerwünschte transversale, d. h. senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung auftretende, als auch longitudinale, d. h. in Strahlausbreitungsrichtung auftretende Effekte gibt.

Zu den longitudinalen Effekten ist generell die hohe Empfindlichkeit des Schneidprozesses gegenüber der Position des Fokus relativ zum Werkstück zu rechnen. Sie muß auf wenige Zehntel mm genau eingehalten werden, damit bei den herkömmlichen Verfahren mit fixierten Fokussierungsparametern reproduzierbare technologische Resultate erzielt werden. Dabei ein Optimum zu finden, ist schwierig, denn die Untersuchungen beweisen, daß bei der Bearbeitung eines Werkstückes der Dicke d

- a) der Prozeßbeginn im allgemeinen am günstigsten bei der Fokussierung direkt auf der Oberseite des Werkstückes erfolgt;
- b) optimale Resultate für den gesamten Schneidprozeß bei einer Fokussierung bei $\frac{1}{3} d$ innerhalb des Werkstoffes zu erwarten sind und
- c) die unerwünschte Bartbildung durch anhaftende Schlacke an der Unterseite des Werkstückes dann minimal wird, wenn der Fokus bei d, also an der Werkstückunterseite liegt.

Alle bisherigen technischen Lösungen zum Laserschneiden geben sich mit einem Kompromiß bezüglich der Fokussierung, meist mit dem Kompromiß b), zufrieden

und zielen lediglich darauf ab, durch eine auf die unterschiedlichste Weise realisierbare Abstandregelung die Lage des Fokus' relativ zum Werkstück weitgehend konstant zu halten. So werden z. B. in der DE-OS 34 11 140 und der DE-OS 35 21 918 Möglichkeiten zur genauen Ausrichtung des Fokus' sowie in der DS-08 30 37 981 und der US-PS 47 61 534 Varianten der Konstanthaltung der Fokussierung relativ zum Werkstück beschrieben.

Zu den transversalen Effekten, die durch die Wechselwirkung Laserstrahlung—Werkstoff im Fokussierungsvolumen verursacht werden, gehört die Riefenbildung an den Schnittflächen. Dieser Effekt beeinflußt in hohem Maße die Qualität des Laserschneidens, so daß zahlreiche Autoren seine physikalisch-technischen Ursachen untersuchten (vgl. z. B. Arata u. a., Trans. SWRI Vol. 8, No. 2, pp. 15—26 (1979); Schuöcker, Walter in "Laser/Optoelektronik in der Technik", Hsg. W. Waidelich, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986, S. 359—364).

Bisher ist als technische Lösung zur Minimierung der Riefenbildung lediglich eine Optimierung aller Schneidparameter und dabei insbesondere die Verwendung definierter Laserimpulse bekannt (vgl. z. B. J. Powell u. a. Proc. of 3rd Int. Conf. on Lasers in Manufacturing, 3—5 June 1986, Paris, pp. 67—75). Die Fokussierungsparameter werden dabei zeitlich konstant gehalten. Die erreichbaren Verbesserungen der Riefenstruktur sind relativ gering.

Ziel der Erfindung ist die Bereitstellung eines Verfahrens zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung, um erstens insbesondere beim Laserschneiden, z. B. dem Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen mit CO₂-Hochleistungslasern, unerwünschte Nebeneffekte, wie die Bildung einer Riefenstruktur an den Schnittflächen und die Bartbildung durch anhaftende Schlacke an der Schnittunterkante, weitgehend zu unterdrücken, zweitens die Dicke der bearbeitbaren Werkstücke zu steigern, drittens die vor allem beim Laserschneiden von Metallen sehr große Empfindlichkeit der Schneidparameter gegen kleinste Schwankungen des Abstandes Fokus—Werkstück zu verringern und viertens auf optimale Weise den flächenhaften definierten Materialabtrag bis in größere Werkstofftiefen zu ermöglichen, so daß in der Summe eine Lasermaterialbearbeitungsanlage im Hinblick auf Bearbeitungsqualität, Reproduzierbarkeit des technologischen Resultates und Effektivität bei geringen zusätzlichen Kosten eine hohe Gebrauchswertsteigerung erfährt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung zu entwickeln, welches die Bearbeitungsergebnisse herkömmlicher Verfahren, die im allgemeinen auf der Einstellung eines zwar optimierten, aber starren Abstandes des Fokus' relativ zum Werkstück und einer fest vorgegebenen Intensitätsverteilung im Fokussierungsvolumen beruhen, in wesentlichen Parametern, wie Bearbeitungsqualität, Reproduzierbarkeit und maximal bearbeitbare Werkstückdicke dadurch übertrifft, daß die Fokussierungsparameter der Eigendynamik des Wechselwirkungsprozesses Laserstrahlung—Werkstoff im Fokussierungsvolumen weitgehend angepaßt werden.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß folgendermaßen gelöst:

Es wurde bereits dargelegt, daß die Dynamik im Fokussierungsvolumen, insbesondere hervorgerufen durch die Eigenschaften des Schmelzbades des bearbeiteten Werkstoffes, beim Laserschneiden zu unerwünschten trans-

versalen und longitudinalen Effekten führt. Deren Minimierung einerseits sowie die Erzielung neuartiger technologischer Effekte z. B. bei der Bearbeitung spröder Materialien wie Glas und Keramik und beim definierten flächenhaften Materialabtrag bis in größere Werkstofftiefen andererseits können nach der erfindungsgemäßen Verfahrensweise dadurch erreicht werden, daß die Parameter des Fokus', d. h. sein effektiver Durchmesser, die Intensitätsverteilung über seinen Querschnitt und seine Lage relativ zum Werkstück, zeitlich variabel gestaltet werden, daß eine "dynamische" Fokussierung realisiert wird.

Voraussetzung für eine solche dynamische Fokussierung ist, daß auf die Fokussieroptik der Materialbearbeitungseinrichtung zwei kollineare Strahlenbündel mit je nach Anwendungsfall wahlweise unterschiedlichem Strahldurchmesser oder unterschiedlicher Divergenz oder beidem fallen. Die Erzeugung dieser Strahlenbündel kann vorteilhaft erfolgen mittels einer Anordnung zur variablen Laserstrahlteilung und Führung der Teilstrahlen, insbesondere für CO₂-Hochleistungslaserstrahlung, bei der die Strahlung des Lasers auf einen Modulator fällt, der als Interferometeranordnung mit wahlweise schnell variierbarer Reflektivität ausgebildet ist. Dieser Modulator ist unter einem Winkel zwischen seiner optischen Achse und der Richtung der Laserstrahlung angeordnet, der einerseits so klein ist, daß die Interferenzfähigkeit des Modulatorsystems nur unwesentlich beeinflußt wird und andererseits so groß ist, daß eine unerwünschte Rückkopplung des vom Modulator reflektierten Strahlungsanteils mit dem Laserresonator ohne die Verwendung optischer Hilfsmittel vermieden wird. Dieser reflektierte Strahlungsanteil wird entweder direkt oder über Hilfsspiegel zur Bearbeitungsstelle geleitet. Der transmittierte Strahlungsanteil wird durch die geeignete Anordnung optischer Mittel in seinen räumlichen Ausbreitungseigenschaften, insbesondere seiner Divergenz und seinem Strahldurchmesser, in gewünschter Weise geändert und so durch den Modulator zurückgeschickt, daß sich dieser doppelt-transmittierte Strahl kollinear dem reflektierten Strahl überlagert. Das Leistungsverhältnis zwischen diesen beiden Arbeitsstrahlen kann in von den Parametern des Modulators vorgegebenen Grenzen und mit Frequenzen innerhalb des ebenfalls durch den Modulator vorgegebenen Bereiches beliebig variiert werden. Beide Strahlenbündel werden nun durch die Fokussieroptik so in das Bearbeitungsvolumen fokussiert, daß sie auf Grund ihrer unterschiedlichen räumlichen Ausbreitungseigenschaften entweder unterschiedliche Fokusbereiche oder beides aufweisen. Die dynamische Fokussierung wird durch Hin- und Herschalten der Strahlungsleistung zwischen den beiden Teilstrahlen mittels der Interferometeranordnung erreicht, und das erfindungsgemäße Verfahren läuft nun so ab, daß der gesamte Materialbearbeitungsprozeß aus einer Folge schnell ablaufender einzelner Arbeitszyklen besteht, wobei jeder dieser Arbeitszyklen durch drei Verfahrensschritte charakterisiert werden kann.

Im ersten Verfahrensschritt wird maximal viel Leistung dem Teilstrahl zugeführt, dessen Fokussierparameter optimalen Startbedingungen entsprechen. Bei den meisten Applikationen wird dies eine Lage des Fokus' an der Oberfläche des Werkstückes sein.

Im zweiten Verfahrensschritt erfolgt ein schnelles Umschalten der Laserleistung in den zweiten Teilstrahl in Zeiten, die der Dynamik des Wechselwirkungsvolumens im Werkstoff angepaßt sind, vorzugsweise im

Zeitbereich $10^{-3} \text{ s} \leq \tau \leq 10^{-1} \text{ s}$. Auf Grund der anderen Fokussierungsparameter dieses Teilstrahles können durch ein geeignet gewähltes Zeitregime die Parameter des Fokus dem Wechselwirkungsprozeß so nachgeführt werden, daß die gewünschte untenstehend näher erläuterte Wirkung eintritt.

Im dritten Verfahrensschritt werden durch Rückschaltung der Laserleistung in den ersten Teilstrahl die Fokussierungsparameter in Zeiten, die analog dem zweiten Verfahrensschritt, die aber auch wesentlich kürzer sein können, wieder in den Ausgangszustand gebracht.

Während des gesamten Arbeitszyklus' bleibt dabei die in das Wechselwirkungsvolumen eingebrachte Gesamtstrahlungsleistung praktisch konstant, wenn das System der variablen Laserstrahlleistung und Führung der Teilstrahlung weitgehend verlustfrei arbeitet. Die durch die dargestellte Verfahrensweise erzielbaren Wirkungen sollen am Beispiel der transversalen und der longitudinalen Effekte beim Laserschneiden näher erläutert werden.

Nach dem Modell von Arata beruht der transversale Effekt "Riefenbildung" beim Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen mit CO₂-Hochleistungslasern auf einem in wenigen ms ablaufenden zyklischen Prozeß des "Zündens" der exothermen Reaktion im Fokusbereich, der raschen Expansion des Schmelzvolumens und der Erstarrung des geschmolzenen Materials, wenn die Reaktionsfront den Bereich des Fokus' verläßt. Anschließend erfolgt wieder die Zündung usw. mit der Folge einer periodischen Riefenstruktur der Schnittfläche. Gemäß der Erfindung wird diesem Pulsieren des Schmelzbades im Fokusbereich und damit der Riefenbildung dadurch entgegengewirkt, daß der Fokusbereich genau in dem Moment verkleinert wird, wenn das Schmelzbad im Begriff ist zu expandieren. Ist die Expansion abgefangen, wird er wieder etwas vergrößert usw., so daß in der Endkonsequenz durch diese Gegensteuerung eine wesentliche Verringerung der Riefenbildung erreicht wird.

Mehrfach sind die Wirkungen des Verfahrens auf die longitudinalen Effekte.

Es wurde bereits dargelegt, daß für unterschiedliche Erscheinungen beim Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen unterschiedliche Fokusbereiche ein optimales Ergebnis bringen. Da durch das erfindungsgemäße Verfahren innerhalb eines Arbeitszyklus' die Fokusbereiche zwischen zwei Extrema pendelt, die den jeweiligen Prozeßparametern angepaßt werden können, sind wesentlich günstigere technologische Resultate erzielbar. Dazu gehören ein optimaler Prozeßstart durch Anfangslage des Fokus' an der Oberseite des Werkstückes und minimale Bartbildung infolge anhaftender Schlacke durch Endlage des Fokus' an der Unterseite des Werkstückes.

Die ständige Oszillation des Fokus' zwischen diesen beiden Extremlagen bewirkt als weiteren Effekt eine Verbesserung der Parallelität der Schnittfuge, insbesondere z. B. den Ausgleich periodischer Variationen der Schnittfugenbreite in Strahlrichtung, die auftreten, wenn das Schneidgas bei sehr hohem Druck als Hyper-schallwelle in die Schnittfuge eingekoppelt wird.

Da die Fokusbereiche praktisch dem Wechselwirkungsprozeß nachgeführt wird, können größere Werkstoffdicken als bei feststehendem Fokus mit der gleichen Laserleistung durchbohrt bzw. getrennt werden.

Die effektive Verlängerung des Fokusschlauches durch die verfahrensgemäße Oszillation der Fokusbereiche bewirkt ferner, praktisch als einfachste Wirkung, eine geringere Empfindlichkeit des Bearbeitungsprozesses

gegen Schwankungen der relativen Lage Fokus—Werkstück, so daß in einer Reihe von Anwendungsfällen sogar auf eine Abstandsregelung verzichtet werden kann.

Die Erfindung soll nachstehend an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert werden.

In den zugehörigen Zeichnungen zeigt

Fig. 1 eine Anordnungsvariante zur variablen Laserstrahlteilung und Führung der Teilstrahlen mit drei Spiegeln zur Formung und Führung des transmittierten Strahles;

Fig. 2 die Fokussierung zweier Arbeitsstrahlen mit gleicher Divergenz, aber unterschiedlichem Durchmesser in das Wechselwirkungsvolumen;

Fig. 3 die Fokussierung zweier Arbeitsstrahlen mit gleichem Durchmesser, aber unterschiedlicher Divergenz in das Wechselwirkungsvolumen.

In der in Fig. 1 dargestellten Anordnungsvariante zur variablen Laserstrahlteilung und Führung der Teilstrahlen fällt die Strahlung 2 des CO₂-Hochleistungslasers 1 auf die von der Versorgungseinrichtung 4 angesteuerte Interferometeranordnung 3, die vorzugsweise durch den Modulator gemäß DD-WP 2 34 208 gebildet wird. Dessen optische Achse 5 ist unter einem Winkel gegen die Richtung des Laserstrahles 2 geneigt. Der Modulator spaltet diesen Strahl auf in den reflektierten Anteil 6 und den transmittierten Anteil 7, der durch ein von den Spiegeln 8 und 9 gebildetes Teleskop geformt und mittels des justierbaren Spiegels 10 ein zweites Mal durch das FPI geschickt wird. Dieser doppelt-transmittierte Anteil 11 wird dem reflektierten Strahl 6 kollinear überlagert, und beide werden gemeinsam der Arbeitsaufgabe zurückgeführt.

Fig. 2 illustriert die Wirkung des Verfahrens beim Auftreffen zweier Arbeitsstrahlen 12 und 13 mit unterschiedlichem Strahldurchmesser, aber gleicher Divergenz auf die Fokussieroptik 14. Der Strahl 12 mit dem größeren Durchmesser wird auf einen kleineren Brennfleck 15 im Wechselwirkungsvolumen 16 des Werkstückes 17 konzentriert, der Strahl 13 mit dem kleineren Durchmesser erzeugt einen größeren Brennfleck 18.

In Fig. 3 wird die Wirkung des Verfahrens bei Nutzung zweier Arbeitsstrahlen 19 und 20 mit gleichem Durchmesser, aber unterschiedlicher Divergenz veranschaulicht. Der leicht konvergente Strahl 19 erzeugt die Fokusslage 21, der leicht divergente Strahl 20 die Fokusslage 22. Da die Strahldurchmesser am Ort der Fokussieroptik 14 gleich sein sollen und für die Erzeugung einer Differenz der Fokusslagen von wenigen mm — dies ist für die meisten praktischen Anwendungen ausreichend — ein geringer Divergenzunterschied der beiden Strahlen genügt, haben beide Foki annähernd gleichen Durchmesser, wenn mit den z. B. für das Laserbrennschneiden von Eisenwerkstoffen typischen praktikablen Brennweiten der Fokussieroptik 14 in der Größenordnung 100 mm bearbeitet wird.

- 9 Teleskopspiegel
- 10 Justierbarer Umlenkspiegel
- 11 Doppelt-transmittierter Anteil der Laserstrahlung
- 12 Arbeitsstrahl mit größerem Durchmesser
- 13 Arbeitsstrahl mit kleinerem Durchmesser
- 14 Fokussieroptik
- 15 Kleinerer Brennfleck
- 16 Wechselwirkungsvolumen
- 17 Werkstück
- 18 Größerer Brennfleck
- 19 Konvergenter Arbeitsstrahl
- 20 Divergenter Arbeitsstrahl
- 21 obere Fokusposition
- 22 untere Fokusposition

Patentanspruch

Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung mit dynamischer Fokussierung, bei welchem auf die Fokussieroptik einer Materialbearbeitungseinrichtung zwei kollineare Strahlenbündel mit je nach Anwendungsfall wahlweise unterschiedlichem Strahlungsdurchmesser oder unterschiedlicher Divergenz oder beidem fallen, **dadurch gekennzeichnet**, daß mittels der Fokussieroptik (14) die beiden Strahlenbündel (12, 13) bzw. (19, 20) so in das Bearbeitungsvolumen (16) fokussiert werden, daß auf Grund ihrer unterschiedlichen räumlichen Ausbreitungseigenschaften beide Teilstrahlen entweder unterschiedliche Fokussdurchmesser oder unterschiedliche Fokusslagen oder beides aufweisen und der gesamte Materialbearbeitungsprozeß aus einer Folge schnell ablaufender einzelner Arbeitszyklen besteht, wobei solch ein einzelner Arbeitszyklus dadurch realisiert wird, daß

im 1. Verfahrensschritt maximal viel Leistung einem der beiden Teilstrahlen zugeführt wird, im allgemeinen wird dies der Teilstrahl sein, dessen Fokussierparameter optimalen Startbedingungen entsprechen;

im 2. Verfahrensschritt ein schnelles Umschalten der Laserleistung in den zweiten Teilstrahl in Zeiten, die der Dynamik des Wechselwirkungsvolumens im Werkstoff angepaßt sind, vorzugsweise im Zeitbereich $10^{-3} \text{ s} \leq \tau \leq 10^{-1} \text{ s}$, erfolgt und

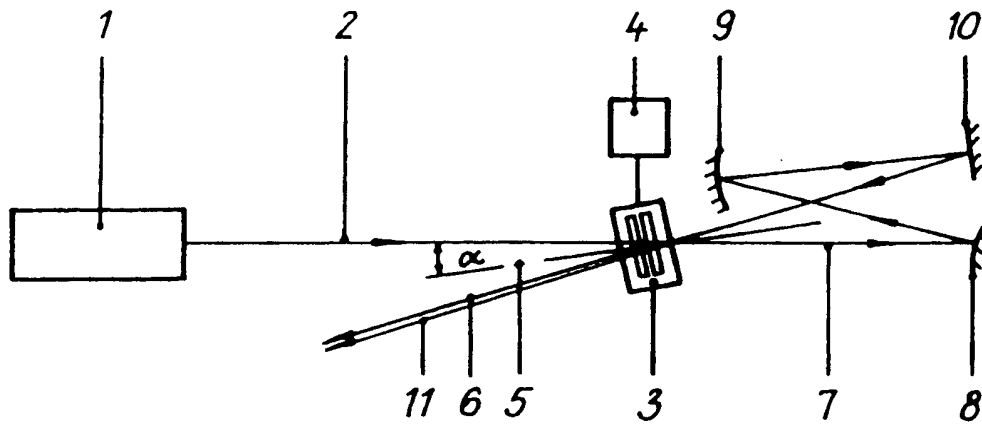
im 3. Verfahrensschritt durch Rückschaltung der Laserleistung in den ersten Teilstrahl die Fokussierparameter in Zeiten, die analog dem 2. Verfahrensschritt, die aber auch wesentlich kürzer sein können, wieder in den Ausgangszustand gebracht werden.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

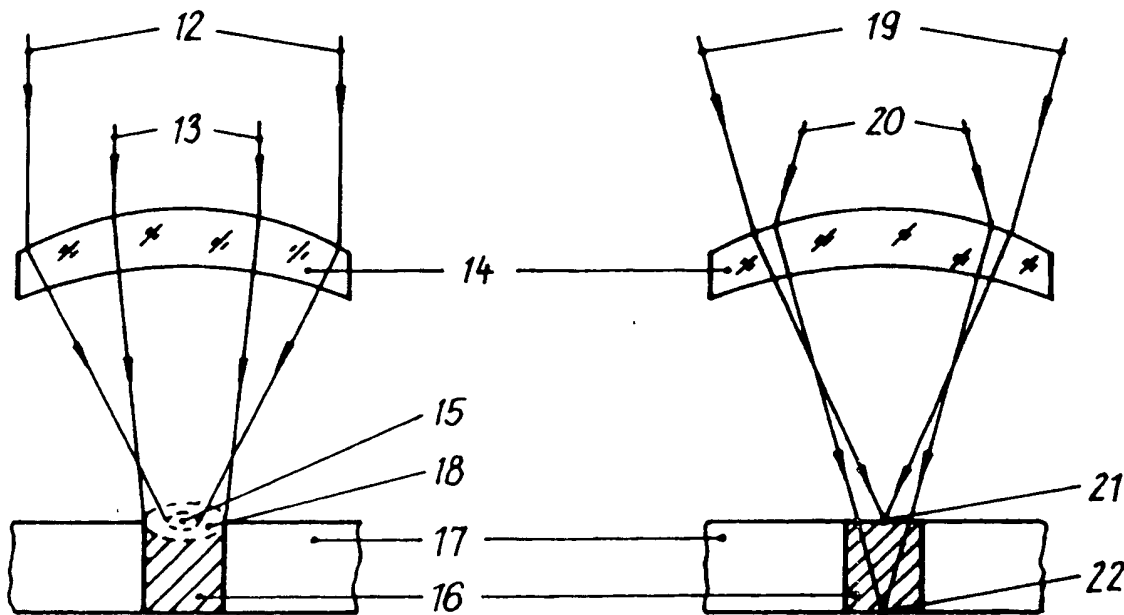
Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

- 1 CO₂-Hochleistungslaser
- 2 Laserstrahlung
- 3 Interferometeranordnung
- 4 Versorgungseinrichtung der Interferometeranordnung
- 5 Optische Achse des Interferometers
- 6 Reflektierter Anteil der Laserstrahlung
- 7 Transmittierter Anteil der Laserstrahlung
- 8 Teleskopspiegel

— Leerseite —



Figur - 1-



Figur - 2-

Figur - 3-